Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение   
высшего образования

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Механико-математический факультет

|  |  |
| --- | --- |
|  | УТВЕРЖДАЮ  Декан механико-математического факультета МГУ  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ /А. И. Шафаревич /  « \_\_\_ » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 г. |
|  | М.П. |

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование дисциплины (модуля): | **Углерод-углеродные композиты: применения, технологии изготовления, формирование структуры и физико-механических свойств** |
| Уровень высшего образования: | Бакалавриат, специалитет, магистратура, аспирантура |
| Направление подготовки /специальность: | Межфакультетский, по выбору студента |
| Направленность(профиль)/специализация ОПОП | Междисциплинарный общеобразовательный курс  для студентов 2-6 курса химфака, физфака, ФКИ, ФНМ, мехмата, факультета журналистики, аспирантов, научных сотрудников и инженеров, менеджеров |
| Форма обучения: | Очная |
| Язык преподавания: | Русский |
| Авторы программы: | Гареев Артур Радикович,  заместитель директора по науке и инновациям АО «НИИграфит» (Росатом), доцент МГТУ  Хохлов Андрей Владимирович,  в.н.с. НИИ механики МГУ, доцент мехмата МГУ |

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

*на заседании кафедры механики композитов*

(протокол № 2/К от 27.05.2024)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки/ специальности для студентов всех факультетов МГУ в соответствии с приказом № 43 от 13 февраля 2013г.

**Содержание**

[1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО 3](#_Toc125280821)

[2. Объем дисциплины (модуля) 3](#_Toc125280822)

[3. Формат обучения 3](#_Toc125280823)

[4. Преподаватели 3](#_Toc125280824)

[5. Входные требования для освоения дисциплины (модуля) 3](#_Toc125280825)

[6. Результаты обучения по дисциплине (модулю) 3](#_Toc125280826)

[7. Содержание дисциплины (модуля) 4](#_Toc125280827)

[8. Ресурсное обеспечение](#_Toc125280828) 4

8.1. [Список основной литературы 4](#_Toc125280829)

8.2. [Список дополнительной литературы 5](#_Toc125280830)

8.3. [Список программного обеспечения 5](#_Toc125280831)

8.4. [Список баз данных и информационных справочных систем 5](#_Toc125280832)

8.5. [Список ресурсов сети «Интернет» 5](#_Toc125280833)

8.6. [Материально-техническое обеспечение 5](#_Toc125280834)

[9. Фонд оценочных средств 6](#_Toc125280835)

9.1. [Вопросы к зачету 6](#_Toc125280836)

9.2. [Текущий контроль успеваемости 8](#_Toc125280837)

9.3. [Промежуточная аттестация 8](#_Toc125280838)

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Дисциплина является межфакультетским курсом

для студентов 2-6 курса химфака, физфака, ФКИ, ФНМ, мехмата, факультета журналистики, аспирантов, научных сотрудников и инженеров, менеджеров научно-технических предприятий (ракетно-космическая и авиационная техника, атомная промышленность, ОПК и т.п.)

1. Объем дисциплины (модуля)

Объем дисциплины (модуля) составляет 1 з.е., 36 академических часов, в том числе 24 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем и 12 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

1. Формат обучения

Дисциплина реализуется в очной форме с использованием электронного обучения

и дистанционных образовательных технологий (для выполнения домашних заданий и консультаций по НИР).

1. Преподаватели

**Гареев Артур Радикович**, заместитель директора по науке и инновациям АО «НИИграфит» (Росатом), доцент МГТУ, доцент кафедры механики композитов мехмата МГУ

**Хохлов Андрей Владимирович**, в.н.с. НИИ механики МГУ, доцент кафедры механики композитов мехмата МГУ, с.н.с. АО «НИИграфит» (Росатом), в.н.с. Московского центра фундаментальной и прикладной математики

1. Входные требования для освоения дисциплины (модуля)

Предварительные условия отсутствуют

1. Результаты обучения по дисциплине (модулю)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Компетенции выпускников** | **Индикаторы достижения компетенций, реализуемые в настоящей дисциплине (модуле)** | **Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций** |
| **Компетенция СПК-1**  Знание идей, теоретических основ, технологий в области свойств, исследования, проектирования и изготовления и приложений углеродных материалов и композитов, умение применять усвоенный подходы и методы в исследовании и моделировании. | **Индикатор СПК-1.1**  Знать основные виды углеродных материалов и композитов, их базовые свойства и приложения, подходы к проектированию, изготовлению и моделированию | Знать основные виды углеродных материалов и композитов, их базовые свойства и приложения, технологии получения, подходы к проектированию, изготовлению и моделированию |
| **Индикатор СПК-1.2**  Уметь применять усвоенные знания об углеродных материалах в разных областях науки и техники | Уметь применять усвоенные знания о свойствах, особенностях проектирования, контроля и изготовления углеродных материалах в разных областях науки и техники |

1. Содержание дисциплины (модуля)

Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименование разделов и тем дисциплины (модуля),**  **Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)** | **Номинальные трудозатраты обучающегося** | | | | |
|  | **Контактная работа  (работа во взаимодействии с преподавателем)**  **Виды контактной работы, ак. ч.** | | | Самостоятельная работа,  ак. ч. |
| Всего,  ак. ч. | Ауд.,  ак. ч. | Лекции,  ак. ч. | Семинары, прак.,  ак. ч. |
| 1. Углеродные волокна (УВ), материалы (УМ) и композиты (УУКМ) в конструкциях разных отраслях промышленности (авиационной, ракетно-космической, атомной и т.п.), основные классы углеродных материалов, требования к их свойствам, история развития их производства | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 2. Свойства, особенности кристаллической и микроструктуры структуры и реализации свойств УУКМ, влияние технологии на формирование свойств композита | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 3. Базовые технологии изготовления УВ УУКМ, основные физико-химические процессы. Графитированные волокна из мезофазных пеков | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 4. Физико-механические свойства УУКМ, их формирование и способы улучшения | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 5. Упругие и вязкоупругопластические свойства УМ при высоких температурах | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 6. Экспериментальные средства и способы исследования структуры и свойств УУКМ. Методики контроля свойств материала, методики контроля технологических процессов | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 7. Подходы к моделированию деформирования и прочности УУКМ. Модификации УУКМ и совершенствование технологий изготовления композитов | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 8. Жизненный цикл, стойкость и надёжность УУКМ | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 9. Искусственный графит как дисперсно-наполненный КМ, применение графитов в технике. Технологии получения графитов | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 10. Свойства, особенности кристаллической и микроструктуры структуры и реализации свойств графитов, влияние технологии на формирование свойств материала | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 11. Проектирование УМ, УУКМ и изделий из них, примеры принятия конструктивно-технологических решений. Постановка актуальных практических задач по применению углеродных и графитовых материалов, анализ предлагаемых слушателями курса подходов и решений | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| Подготовка и проведение зачета | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| **Итого** | **36** | **24** | **24** | **0** | **12** |

1. Ресурсное обеспечение

Список основной литературы:

1. Епифановский И. С. Композиционные углерод-углеродные материалы в конструкциях летательных аппаратов: учеб.пособие. - М. : Изд-во МГТУ, 1993. - 48 с., ил.
2. Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. Пространственно армированные композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
3. BuckleyJ. D., EdieD. D. Carbon-carbon materials and composites. Noyes Publications, 1993.
4. Savage G.Carbon-carbon composites.Springer, 1993.
5. SheehanJ. E., BueskingK. W., SullivanB. J. Carbon-Carbon Composites. В: Annual Review of Materials Science, Vol. 24, 1994. pp. 19-44.
6. FitzerE., ManochaL. M. Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites.Springer, 1998.

Список дополнительной литературы:

1. HashinZ. Theory of fiber reinforced materials. Contractor Report. University of Pennsylvania, 1972.
2. HashinZ. Analysis of Composite Materials – A Survey. Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, 1983.pp. 481-505.­
3. Hashin Z. Thermoelastic properties and conductivity of carbon/carbon fiber composites. Mechanics of Materials Vol. 8, Issue 4,1990.pp. 293-308.
4. ChristensenR. M. Mechanics of Composite Materials. Dover Publications, 2005.
5. Candler G. V. Rate Effects in Hypersonic Flows. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 51, 2019.pp. 379-402.
6. Simmons, J.H.W. Radiation damage in graphite. Pergamon Press, 1965.
7. Arregui-Mena J.D. et al. A Review of Finite Element Method Models for Nuclear Graphite Applications. Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 27, 2020. pp. 331-350.
8. Burchell T. D., Pavlov T. R. 7.11 – Graphite: Properties and Characteristics. Comprehensive Nuclear Materials. Elsevier, 2020. pp. 355-381.
9. Campbell A. A., Burchell T. D. 3.11 - Radiation Effects in Graphite. Comprehensive Nuclear Materials. Elsevier, 2020.pp. 398-436.
10. Burchell, T. et al. The fracture toughness of nuclear graphite grades. Oak Ridge National Laboratory. 2022.
11. Burchell T., Yahr T., Battiste R. Modeling the multiaxial strength of H-451 nuclear grade graphite. Carbon, Vol. 45, 2007. pp. 2570-2583.
12. Hupp T. R. et al. Graphite, Artificial. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Wiley, 2003.
13. Marsden B. J. et al. Dimensional change, irradiation creep and thermal/mechanical property changes in nuclear graphite. International Materials Reviews, Vol. 61(3), 2016. pp. 155-182.
14. Marsden B. J., Hall G. N., Jones A. N. 4.13 - Graphite in Gas-Cooled Reactors. Comprehensive Nuclear Materials, Elsevier, 2020. pp. 357-421.
15. Mohanty S., Majumdar S., Srinivasan M. HTGR Graphite Core Component Stress Analysis Research Program–Task 1. Technical Letter Report. Argonne National Laboratory,2011.
16. Burchell T. D. Irradiation induced creep behavior of H-451 graphite. Journal of Nuclear Materials, Vol. 381, 2008. pp. 46–54.
17. Ryan M. P. et al. On the thermal oxidation of nuclear graphite relevant to high-temperature gas cooled reactors. Journal of Nuclear Materials. Elsevier, Vol. 573, 2023. pp. 154103.
18. ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section III-Rules for Construction of Nuclear Facility Components-Division 5-High Temperature Reactors. 2017.
19. А.Р. Гареев, А.В. Находнова, В.И. Сапожников Методы испытаний углеродных материалов: учеб.пособие. - М. : Изд-во МГТУ

Список программного обеспечения

Не требуется (при использовании ДОТ – Zoom или эквивалентная по функциям система)

Список баз данных и информационных справочных систем

Общие библиотечные ресурсы

Список ресурсов сети «Интернет»

Материально-техническое обеспечение

Аудитория (при использовании ДОТ – Zoom или эквивалентная по функциям система)

1. Фонд оценочных средств
   1. Как текущий, так и итоговый контроль осуществляется в форме «Интерактивного экзамена», когда обучающиеся экзаменуют друг друга по вопросам, которые они сами готовят к каждому занятию и к зачету.
   2. Примерные варианты вопросов к зачету (вопросы, подготовленные обучающимися – по материалам прошлых лет):

1. Основные виды, свойства, преимущества и приложения УУКМ. Их недостатки и способы их устранения.

2. Какие основные свойства композиционных материалов с углеродной матрицей и графитов позволяют считать их лучшими жаростойкими и термопрочными материалами?

3. Какие задачи углеродные материалы выполняют в атомных реакторах? Какое взаимное влияние углеродных материалов и потока нейтронов в реакторах? Факторы радиационной стойкости УМ, сопоставление с жаропрочными сплавами.

4.Какие основные, виды армирования применяются для композиционных материалов с углеродной матрицей в промышленности? Какой вид армирования в привязке к технологии получения "зелёной"заготовки позволяет получать высокое наполнение?

5. Особенности условий контакта в композиционных материалах с углеродной матрицей. При каких условиях потребуется учитывать проскальзывание в зоне контакта при расчете НДС?

6. Если рассмотреть технологию получения композиционных материалов с углеродной матрицей как три основных операции:  
- получение "зелёной" заготовки с полимерной матрицей;  
- уплотнение углеродной матрицы  
- высокотемпературная обработка.  
Какие из этих операций являются повторяющимся, цикличными? В какой последовательности и почему с точки зрения структуры материала и особенности процесса заполнения матрицей в объеме всего материала? На какой операции задается объемная доля армирующего наполнителя?

7. Какие подходы позволяют в соответствии с функциональными или конструктивными требованиями варьировать физико - механические свойства композиционных материалов с углеродной матрицей.

8. Каковы причины (и способы формирования) анизотропии механических свойств для искусственных графитов, какие подходы к нахождению эффективных характеристик применяются для графитов.

9. Какие подходы к нахождению среднеэффективных характеристик применимы для однонаправленных композиционных материалов с углеродной матрицей, в каких условиях они справедливы? Найдите среднеэффективный модуль упругости для однонаправленного композиционного материала с углеродной матрицей если известны модули упругости углеродного волокна 230 ГПа и матрицы 8 ГПа , уточните условия применимости такого подхода.

10. В каких случаях и с какой целью требуется учитывать предельные деформации матрицы при проектировании деталей и конструкций из композиционных материалов с углеродной матрицей.

11. Какие особенности технологии получения композиционных материалов с углеродной матрицей позволяют столь широко варьировать физико-механические и физико-химические свойства материала.

12. От чего зависит унос углеродных и графитовых материалов в горячих газовых потоках? Какие подходы применимы при моделировании уноса углеродных и графитовых материалов в горячих газовых потоках?

13. Какие основные характеристики материала определяют его термопрочность и почему? В чем особенности неоднородных и анизотропных материалов по сравнению с однородными и изотропными?

14. Каково влияние технологии получения композиционных материалов с углеродной матрицей на структуру и свойства материала? Перечислите основные факторы, механизмы и характеристики технологических операций

15. Насколько эффективна реализация основных физико-механических свойств наполнителя в углерод - углеродных КМ, какие факторы определяют эффективность? Каковы способы ее повышения?

16. Приведите пример конструкции из композиционного материала с углеродной матрицей, в которой применение критерия наибольших нормальных напряжений, не может обеспечить запас прочности, требуемый для сохранения работоспособности.

17. Каковы особенности работы углеродных материалов в условиях фрикционного износа? Какие нагрузки и свойства материала требуется учитывать при моделировании НДС углеродных композитных тормозных дисков?

18. Какие примеры конструкций из композиционных материалов с углеродной матрицей вам известны? Каковы особенности условий их эксплуатации и причины выбора УУКМ?

19. Каковы два главных требования к технологии при разработке ответственных конструкций? Какие особенности технологии необходимо учитывать для крупногабаритных конструкций в случае углерод - углеродных и углерод-керамических композиционных материалов?

20. Каким образом проводят сравнение эффективности разнородных материалов для конструкций авиа и ракетостроения? Какие основные требования к материалам применяемым в авиа, ракетостроении, материалам для космических конструкций, приведите примеры.

21. Основные классы углеродных материалов, их свойства и сферы приложения.

22. Базовые технологии изготовления УУКМ, основные физико-химические процессы, протекающие в процессе изготовления и их влияние на свойства продуктов.

23. Физико-механические свойства УУКМ, их формирование и способы улучшения.

24. Зависимость механических свойств УУКМ от температуры

25. Основные экспериментальные средства и способы исследования структуры и свойств УУКМ

26. Подходы к моделированию деформирования и прочности УУКМ

27. Какие стадии (технологические операции) включает базовая технология изготовления композиционных материалов с углеродной матрицей?

28. Опишите явление скоростного упрочнения, его основные закономерности и предположения при моделировании.

29. Какие экспериментальные стенды используются в разных диапазонах скоростей деформации? Какие гипотезы об НДС лежат в основе испытаний?

30. Кратко опишите существующие стенды для измерения свойств материалов при высоких скоростях деформации.

31. Приведите примеры проектирования изделий с учетом скоростного упрочнения материала.

32. Опишите принцип действия, преимущества и недостатки, а также целевую область использования ударных копров.

33. Опишите принцип действия, преимущества и недостатки, а также целевую область использования метода Гопкинсона-Кольского.

34. Опишите принцип действия, преимущества и недостатки, а также целевую область использования метода Тейлора.

35. Опишите принцип действия, преимущества и недостатки, а также целевую область использования метода соударения пластин.

36. Опишите современные методы улучшения методик высокоскоростных исследований.

37. Почему проектирование конструкций, содержащих элементы из УУКМ, является сложной задачей? От чего зависят термомеханические свойства УУКМ? В каких диапазонах находятся их характеристики?

38. Основные виды, свойства, преимущества и приложения углепластиков.

39. Какие проблемы возникают при экспериментальном исследовании свойств УУКМ?

40. Что представляет из себя структура многомерно-армированных УУКМ на различных масштабных уровнях?

41. Какие многомасштабные подходы могут быть полезны при моделировании свойств УУКМ?

42. Какие определяющие соотношения следует использовать при моделировании деформирования однонаправленных, армированных непрерывными волокнами, УУКМ, используемых в условиях относительно медленного нагружения при умеренных (< 1500◦C) температурах?

43. Какие  структурные особенности  углеродных филаментов объясняют их чрезвычайно высокие термомеханические свойства в осевом направлении?

44. Чем отличается структура матрицы внутри углерод-углеродных стержней от матрицы, расположенной на некотором расстоянии от стержней?

45. Что такое представительный объем композиционного материала?

46. Какие методы определения эффективных свойств гетерогенных материалов применяются для оценки характеристик однонаправленных УУКМ?

47. Дайте определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности изотропного материала. Сформулируйте закон теплопередачи Фурье, уравнение теплопроводности и основные краевые задачи для него

48. Из чего и как изготавливают углеродные волокна? Каков их диаметр и физико-механические характеристики? Что такое графен, фуллерены, нанотрубки? Какие они бывают? Для чего их можно использовать?

49. Каким образом можно определить (оценить) диапазон упругости материла и степень выраженности его вязкопластических свойств? Как они меняются с ростом температуры?

50. Какие материалы обладают самыми высокими величинами теплопроводности? Какие материалы обладают самыми высокими величинами температурутуропроводности? Зависят ли эти величины от направления теплового потока?

51. Особенности формирования кристаллической структуры в композиционных материалах с углеродной матрицей. Влияние кристаллической структуры на свойства композита.

52. Особенности микроструктуры УУКМ, влияние микроструктуры на свойства композита.

53. Режимы работы УУКМ в ракетно-космической технике

54.Режимы работы УУКМ в энергетическом оборудовании

55.Жидкофазное формирование углеродной матрицы, основные физико-химические процессы и этапы коксования, карбонизации, графитации матрицы.

56.Высокотемпературная обработка как технологическая операция, особенности формирования свойств композиционного материала.

57.Условия работы УУКМ при термоударе, эрозионном уносе.

58.Зависимость физико-механических и теплофизических свойств УУКМ от температуры.

59.Основные технологические и структурные подходы к вариации свойств УУКМ.

60.Основные свойства 1D, 2D, 3D УУК, особенности работы материалов при статической нагрузке, особенности проектирования нагруженных конструкций.

61. Искусственный графит как дисперсно-наполненный КМ, микроструктура материала. Основные физико-механические, теплофизические свойства графитов. Анизотропия свойств

62. Технологии получения искусственных графитов.

63. Графит как конструкционный и функциональный композиционный материал, применение графита в технике.

64. Радиационная стойкость графитов.

65. Контроль свойств материала в рамках технологического процесса его получения.

66. Особенности проектирования конструкций из хрупких КМ.

67. Оценка надежности КМ, основы проектирования безотказных конструкций.

68. Расчет параметров технологических процессов.

69. Методики контроля свойств материалов.

70. Основные сырьевые компоненты для изготовления графитов и УУКМ

* 1. Текущий контроль успеваемости

Осуществляется в форме «Интерактивного экзамена»

Промежуточная аттестация

Зачет